

阿蘇火山における過去約9万年間の降下軽石堆積物

宮縁育夫*・星住英夫**・高田英樹***・渡辺一徳****・徐勝*****

(2002年8月12日受付, 2003年3月6日受理)

Pumice-fall Deposits from Aso Volcano during the Past 90,000 Years, Southwestern Japan

Yasuo MIYABUCHI*, Hideo HOSHIZUMI**, Hideki TAKADA***,
Kazunori WATANABE**** and Sheng XU*****

Aso central cones located within Aso caldera, central Kyushu, southwestern Japan, initiated their activity soon after the formation of the caldera (ca. 90 ka). The cones have produced voluminous airfall tephra layers and lava flows. Most of the tephra layers distributed in and around Aso caldera are andesite to basaltic-andesite scoria-fall and ash-fall deposits. Their stratigraphy is very complicated because it is difficult to distinguish between scoria-fall layers in the field. However, dacite to rhyolite pumice-fall deposits from some central cones interbedded between the tephra layers are very useful to correlate stratigraphic units at separated localities. Therefore, we used the pumice-fall deposits in order to construct the tephrostratigraphy and eruptive history of Aso central cones during the past 90,000 years. Thirty-six pumice-fall deposits were identified including eleven major key beds. In ascending order they are Nojiri pumice (NjP), Ogashiwa pumice (OgP), Yamasaki pumice 5 (YmP5), Sasakura pumice 2 (SsP2) and 1 (SsP1), Aso central cone pumice 6 to 3 (ACP6-ACP3), Kusasenrigahama pumice (Kpfa) and Aso central cone pumice 1 (ACP1). Phenocrystic minerals of most pumice are plagioclase, ortho- and clinopyroxene and magnetite, but NjP, ACP5, ACP3 and ACP1 include biotite, and NjP and SsP2 contains hornblende phenocrysts. On the basis of several ^{14}C ages of buried soils just below pumice (above Kpfa) and stratigraphic position eruption ages for the eleven major pumice are estimated as follows: NjP (85 ka), OgP (80 ka), YmP5 (69 ka), SsP2 (57 ka), SsP1 (56 ka), ACP6 (52 ka), ACP5 (45 ka), ACP4 (40 ka), ACP3 (39 ka), Kpfa (31 ka) and ACP1 (4 ka). During the past 90,000 years Aso central cones produced pumice-fall deposits at an interval of about 2,500 years. Many of the sources of the pumice appear now buried under the present Aso central cones.

1. はじめに

阿蘇火山は九州中央部に位置し、現在も活動中の火口丘をもつカルデラ火山である。その活動は、約27万年前のAso-1火砕流を含む噴火サイクルで始まり、その後、約9万年前のAso-4サイクルまで4回の大規模な火砕流噴火を繰り返し(小野・他, 1977; 松本・他, 1991)、南北

約25 km、東西約18 kmのカルデラを形成した(小野・渡辺, 1985)。阿蘇カルデラ内には、約9万年前のAso-4直後に活動を開始した(小野・渡辺, 1983)17座以上の火山の複合体である中央火口丘群が存在している。カルデラ周辺のAso-4火砕流堆積物上には、中央火口丘群起源の膨大な量の降下テフラが堆積しているが、Aso-4以

* 〒860-0862 熊本市黒髪4-11-16
森林総合研究所九州支所
Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Kurokami 4-11-16, Kumamoto 860-0862, Japan.

** 〒305-8567 つくば市東1-1-1 中央第7
産業技術総合研究所地球科学情報研究部門
Institute of Geoscience, Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba Central 7, Higashi 1-1-1, Tsukuba 305-8567, Japan.

*** 〒862-8609 熊本市水前寺6-18-1
熊本県教育庁文化課
Cultural Division, Kumamoto Prefectural Govern-

ment, Suizenji 6-18-1, Kumamoto 862-8609, Japan.

**** 〒860-8555 熊本市黒髪2-40-1
熊本大学教育学部
Faculty of Education, Kumamoto University, Kurokami 2-40-1, Kumamoto 860-8555, Japan.

***** グラスゴー大学スコットランド環境研究センター
Scottish Universities Environmental Research Centre, University of Glasgow, Scottish Enterprise Technology Park, East Kilbride, G75 0QF, UK.

Corresponding author: Yasuo Miyabuchi
e-mail: yasuo@affrc.go.jp

降の噴火史は十分に確立されていない。

本研究は、対比が比較的容易である降下軽石堆積物に注目し、その層序や岩相、噴出年代を明らかにすることによって、Aso-4以降、約9万年間のテフラ層序の骨組みを確立することを目的としている。

2. 阿蘇中央火口丘群テフラに関する研究史と層序の概要

約9万年前に活動を開始した現在の中央火口丘群のマグマは玄武岩から流紋岩までの広い組成範囲からなり、現在見えている山体の形成順序は小野・渡辺(1985)や渡辺(2001)によって詳しく述べられている。

降下テフラについては、高田(1989)、早川・井村(1991)、山田・久保寺(1996)、馬場・他(1999)などの研究がある。このうち早川・井村(1991)はAso-4以降の噴火史を記述したが、Aso-4だけでなく、広域テフラ(始良 Tn 火山灰、鬼界アカホヤ火山灰)の対比などにも問題点を残したものになっている(小野・他, 1995)。Aso-4以降のテフラ層序の概要を最もよく表しているのは、高田(1989)による研究で、中央火口丘起源の6層の降下軽石(ACP1~ACP6)と広域テフラとの層位関係を報告している。しかしながら、これらの研究では各テフラの記載は十分でなく、テフラの年代についても新しい部分を除いて十分に議論されていない。

阿蘇火山中央火口丘群から噴出し降下テフラは、とくに阿蘇カルデラ東方域にあたる^{いちのみやまち なみのそん たかもり}の宮町・波野村・高森町付近に厚く堆積している。Aso-4以降の全層厚は厚いところで60 mを超えており、カルデラ縁では100 m程度に達している(渡辺・藤本, 1992)。

先述のように、中央火口丘群のマグマの組成には幅があるものの、玄武岩~玄武岩質安山岩が最も卓越している(小野, 1989)。そのことを反映して、降下テフラの大部分は安山岩から玄武岩質の降下スコリア堆積物と降下火山灰である。それらの量は膨大であり、岩相も極めて酷似している。一方、降下スコリアや火山灰層間には、いくつかの軽石層が挟在していて、テフラ層序を把握する上での重要な鍵層となっている(Table 1)。調査地域における鍵層としては、広域に分布する3層のテフラが従来知られていた。それらは草千里ヶ浜軽石(略称 Kpfa または ACP2)、約25,000 yrs BP (¹⁴C年代; 池田・他, 1995)の始良 Tn 火山灰(略称 AT; 町田・新井, 1976; 1992)および約6,300 yrs BP の鬼界アカホヤ火山灰(略称 K-Ah; 長友・庄子, 1977; 町田・新井, 1978; 1992)である(渡辺・高田, 1990など)。しかし、これらの鍵層を含め、全てのテフラは噴出源に近いカルデラ内では中央火口丘群の新しい噴出物に覆われるため、1万年前より

Table 1. List of pumice-fall deposits and their stratigraphic relations with widespread tephra layers. *Accurate stratigraphic positions cannot be determined.

阿蘇中央火口丘第1軽石	Aso central cone pumice 1 (ACP1)
----- 鬼界アカホヤ火山灰	Kikai Akahoya ash (K-Ah) ca.7.3 ka -----
中久保第1軽石	Nakakubo pumice 1 (NbP1)
中久保第2軽石	Nakakubo pumice 2 (NbP2)
保手が谷軽石*	Hotegatani pumice (HP)*
----- 始良 Tn 火山灰	Aira Tn ash (AT) ca.29 ka -----
草千里ヶ浜軽石	Kusasenrigahama pumice (Kpfa=ACP2)
水ノ元第1軽石	Mizunomoto pumice 1 (MzP1)
水ノ元第2軽石	Mizunomoto pumice 2 (MzP2)
阿蘇中央火口丘第3軽石	Aso central cone pumice 3 (ACP3)
阿蘇中央火口丘第4軽石	Aso central cone pumice 4 (ACP4)
水ノ元第3軽石	Mizunomoto pumice 3 (MzP3)
阿蘇中央火口丘第5軽石	Aso central cone pumice 5 (ACP5)
阿蘇中央火口丘第6軽石	Aso central cone pumice 6 (ACP6)
水ノ元第4軽石	Mizunomoto pumice 4 (MzP4)
----- 九重飯田火砕流	Kuju Handa pfl (Kj-Hnd) ca.54 ka -----
大道第1軽石	Ohmich pumice 1 (Omp1)
笹倉第1軽石	Sasakura pumice 1 (SsP1)
笹倉第2軽石	Sasakura pumice 2 (SsP2)
山崎第1~第5軽石	Yamasaki pumice 1 to 5 (YmP1-YmP5)
山崎第6~第10軽石	Yamasaki pumice 6 to 10 (YmP6-YmP10)
山崎第11軽石	Yamasaki pumice 11 (YmP11)
山崎第12~第13軽石	Yamasaki pumice 12 to 13 (YmP12-YmP13)
上玉来第1軽石	Kamitamarai pumice 1 (KtP1)
上玉来第2軽石	Kamitamarai pumice 2 (KtP2)
小柏軽石*	Ogashiwa pumice (OgP)*
祭場第1~第3軽石	Matsuriba pumice 1 to 3 (MbP1-MbP3)
野尻軽石	Nojiri pumice (NjP)
----- 阿蘇-4火砕流	Aso-4 pfl ca.89 ka -----

古いテフラの露出はほとんどない。またテフラが次第に薄くなるカルデラ東方域においても、下位のテフラの露出は限定されており、これらのことがテフラ全体の調査を困難にしていた。最近になって、約15,000年間の噴火史の概要が明らかにされつつある(渡辺・他, 1991; 渡辺, 1992; 宮縁・渡辺, 1997)が、Aso-4以降、約9万年間の噴火史を組み立てるには至っていない。

波野村を南北に縦断する広域基幹林道阿蘇東部線の工事が1995年に開始されたことに伴い、多くの露頭が出現した。筆者らは、1997年より林道工事に伴う切り取り法面における層序・層相の観察と試料の採取を行ってきた。さらにテフラが比較的薄く概観が把握しやすいカルデラの南西側や遠方の地域においても現地調査を実施した(Figs. 1, 2)。

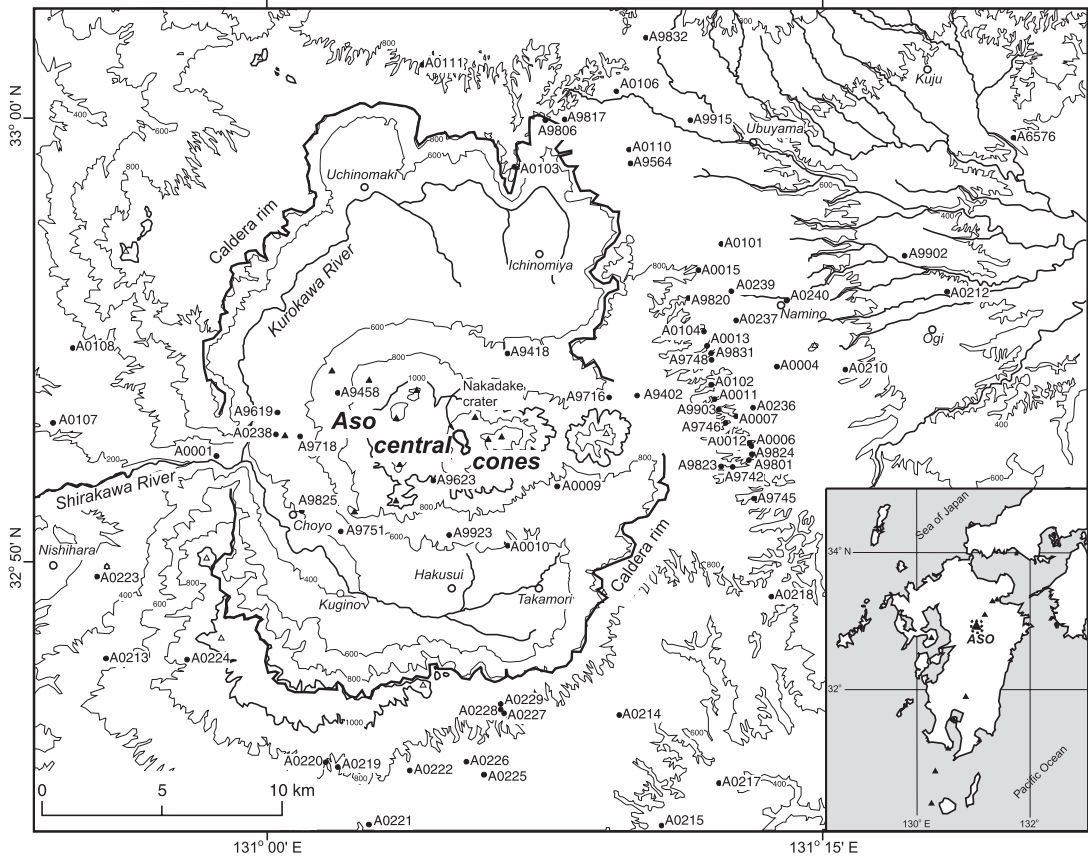


Fig. 1. Site-location map of measured stratigraphic sections in and around Aso caldera. Open and solid triangles show peaks of major Pre-Aso volcanoes and post-caldera central cones, respectively.

各露頭においては、降下スコリア・軽石・火山灰・火山灰土といった全てのテフラおよび土壌層に関して観察を行っているが、本報ではテフラ層序を確立するうえで、鍵層となる主な降下軽石層について、その層序と特徴について述べる。

阿蘇カルデラ周辺に分布する Aso-4 以降の降下軽石層は、今回の調査により確認できただけで 36 層と多い (Fig. 3, Table 2)。軽石層はしばしば砂質の火山灰層を伴い、上下を褐色火山灰土層で区切られる。それらの軽石層以外にも薄い火山灰層が褐色火山灰土層中に断片的に認められることがある。

阿蘇中央火口丘起源の降下軽石としては、阿蘇中央火口丘第 1～第 6 軽石 (高田, 1989) と保手が谷軽石 (馬場・他, 1999) がこれまで報告されているが、今回の調査によって新たに 29 層の降下軽石層が発見された。これまで報告されている軽石層については、対比の混乱を避けるために同じ層名を踏襲し、新たに認められた軽石に関しては新称を与えることにした。なお、阿蘇中央火口丘第 1～第 6 軽石間にも新たな軽石が認められただけ

でなく、今後の調査によっても軽石が発見される可能性も高いので、模式地点と上位からの軽石層数を用いて命名する方法を採用した (例えば、山崎第 1 軽石など)。

以下では、これらの軽石層の中で、対比に重要な軽石層について詳しく記述するが、層厚分布がある程度明らかになった軽石層に関しては、Fierstein and Nathenson (1992) の方法を用いて見かけ体積を計算し、その量から VEI (Volcanic Explosivity Index; Newhall and Self, 1982) を決定した (Table 2)。見かけ体積が計算できなかった軽石層については、おおよその層厚や分布から VEI を推定した。また、本論で記載する色調はマンセル方式の標準土色帖 (小山・竹原, 1967) によるものである。

3. 主要な降下軽石堆積物の記載

3-1 野尻軽石 (NjP; 新称)

野尻軽石 (略称 NjP) は、高森町祭場 (A0218 地点) および波野村山崎 (A0236 地点) において認められた軽石層である。模式地 (A0218 地点) では Aso-4 の上位約 2.5 m に存在しており、全層厚は 132 cm である (Fig. 2)。

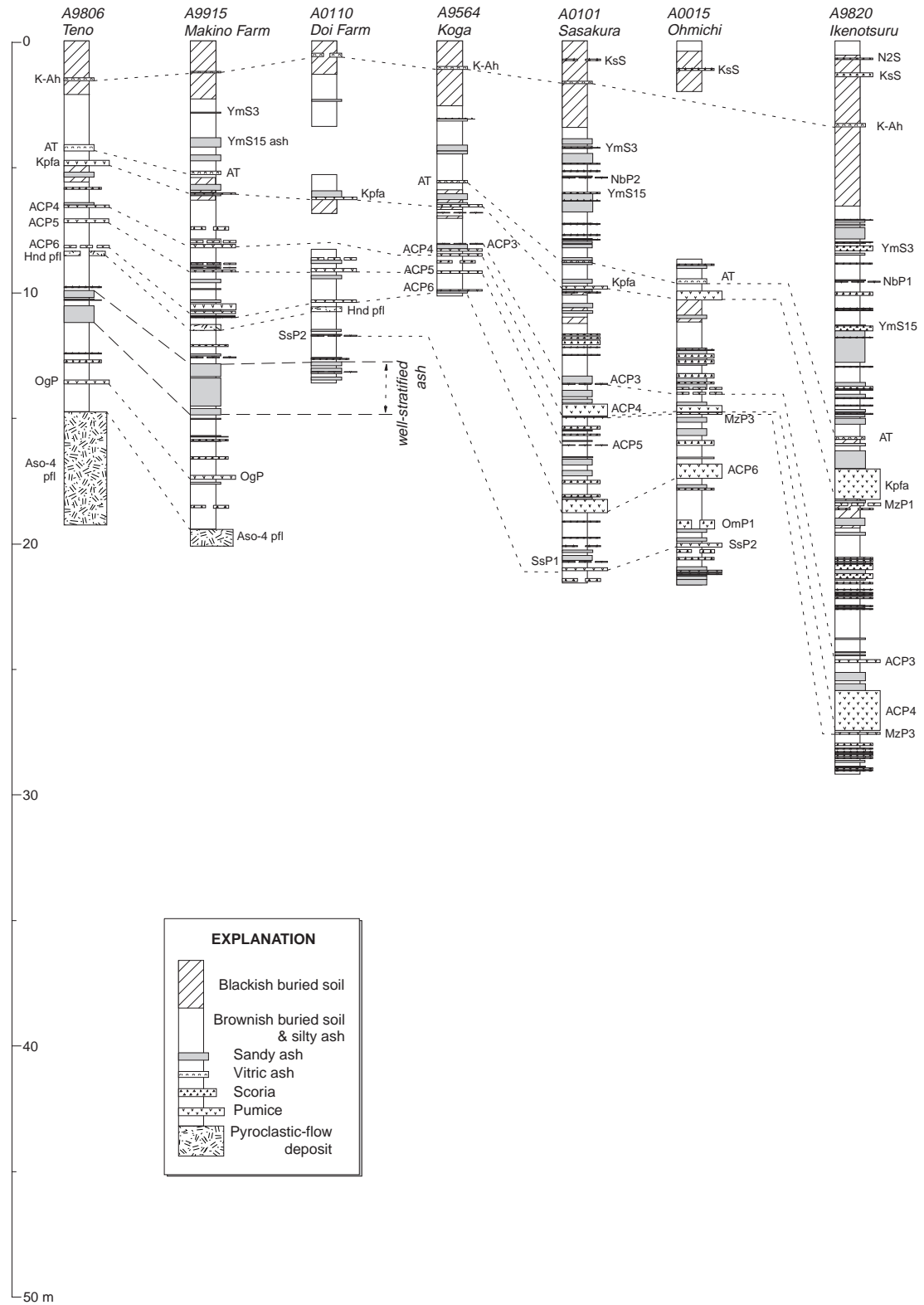


Fig. 2. Stratigraphic relations of airfall tephra layers from Aso central cones at sections northeast to southeast of Aso caldera. See Fig. 1 for locations of the sites.

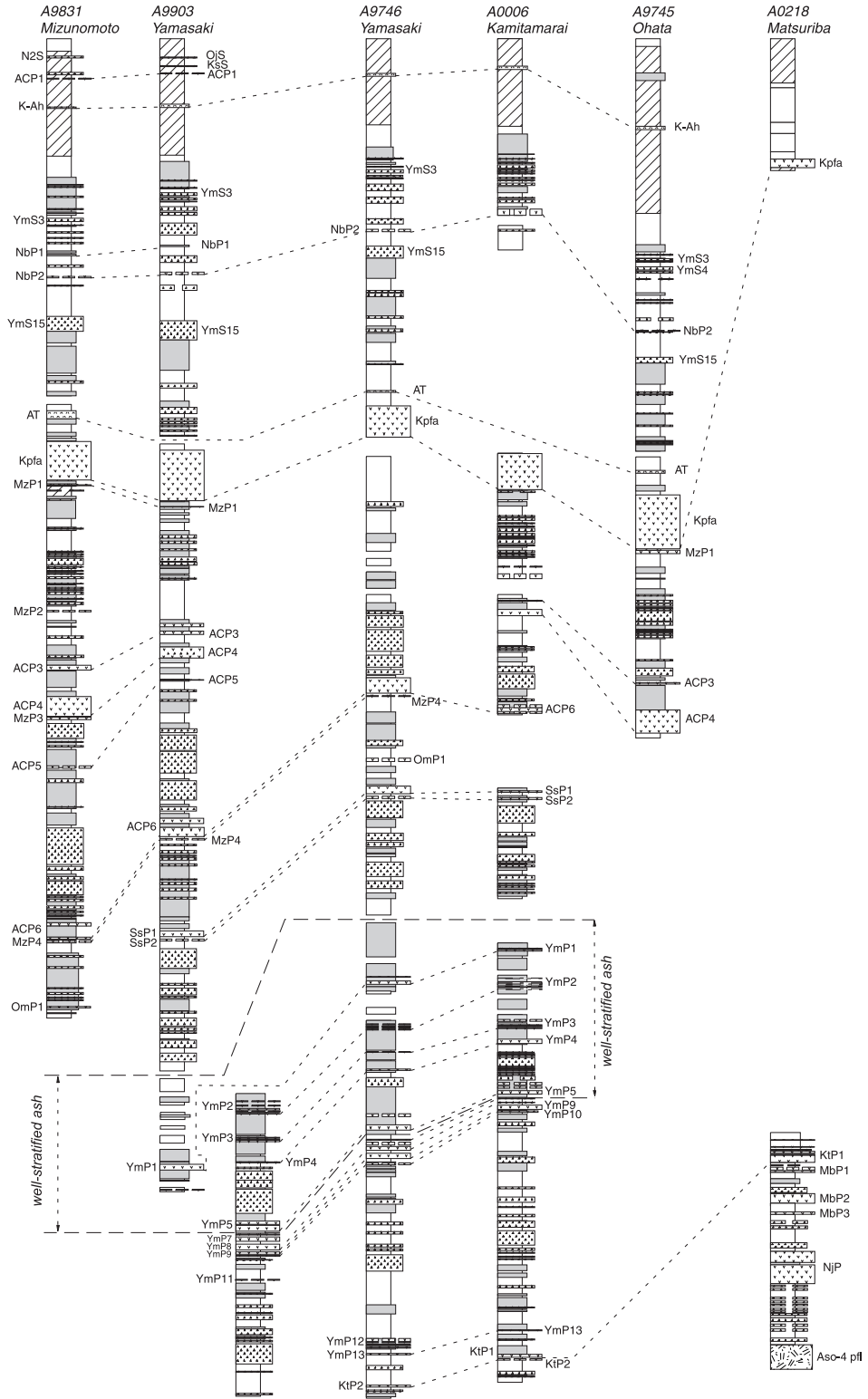


Fig. 2. continued.

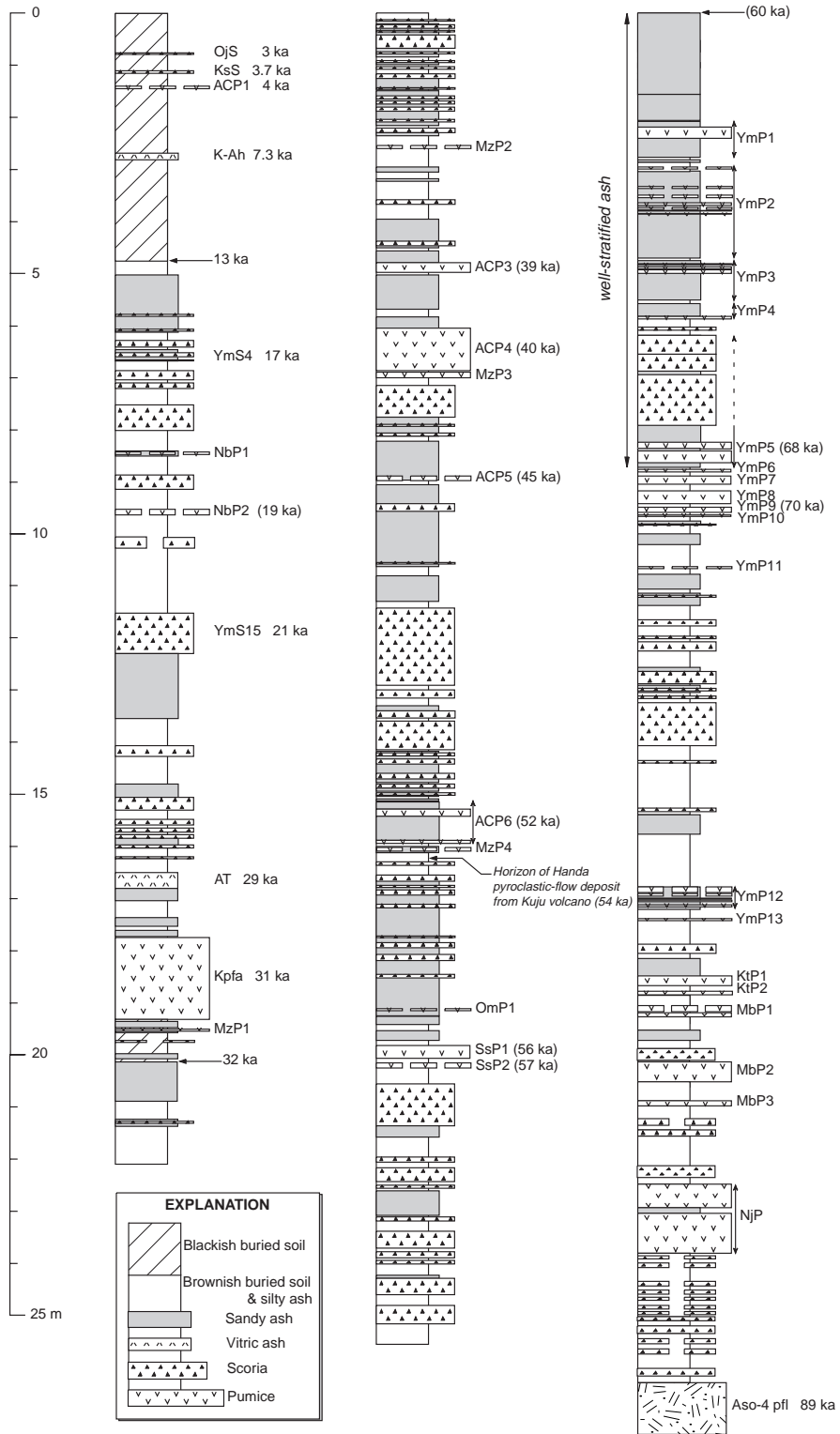


Fig. 3. Generalized composite stratigraphy of tephra layers from Aso central cones during the past 90,000 years at the east of Aso caldera. Detail names of pumice-fall deposits are shown in Tables 1 and 2. Ages were determined by calibrated ¹⁴C dates and K-Ar dates and ages in parentheses were estimated by their stratigraphic positions.

オリブ褐色 (2.5Y4/6) のシルト質火山灰層を挟んで下部と上部とに分かれる。下部の層厚は77 cmで、全体的に浅黄色 (2.5Y7/3)～淡黄色 (2.5Y8/4) に風化しているが、粒径や色調の違いにより少なくとも4つのフォールユニットに区分できる。下部の上半分は軽石の最大粒径 (MP; 各露頭における最大の軽石3個の長径平均値) は4 cmと粗粒で、岩片や暗色の軽石が認められる。シルト質火山灰 (層厚10 cm) を挟んだ上部は層厚45 cmで、下部と同様に淡黄色 (2.5Y8/4) に風化しており (MP: 2.5 cm)、少量の黒色岩片と黒曜石を含んでいる。軽石中の有色鉱物としては、下部には角閃石が認められ、上部には角閃石と黒雲母が含まれている。このように上部と下部とで斑晶鉱物組合せが異なるだけでなく、角閃石と黒雲母の両方を含むことは、阿蘇起源テフラとして特異である。模式地の約8 km北方のA0236地点では層厚が57 cmと薄くなり、カルデラ北東方では存在しないことから、本層の分布主軸は南東方向にあるものと考えられる。小野・他 (1977) は、竹田幅南西端地域 (A0218地点より南東へ3 km付近) においてAso-4直上に厚さ170 cmに達する白色軽石層を認めており、おそらくその軽石層は本テフラに相当するものである。本テフラの正確な分布は不明であるが、カルデラ縁から6 kmを超えた地点においても約130 cmの層厚を有することから、本層はAso-4以降における最大級の噴火堆積物の一つであろう (VEI 4～5程度)。

3-2 小柏軽石 (OgP; 新称)

阿蘇カルデラの北東方においては、Aso-4の約1～2 m上位の層準に、風化していて明褐色 (7.5YR5/8) を呈する軽石層が存在する。本層は、一の宮町小柏 (A0106地点) を模式地とすることから、本報で小柏軽石 (略称OgP) と命名した。層厚はカルデラ北東方の3地点 (A9806, A0106, A9915地点) とも16 cmであり、全体的に無層理である。下位には時間間隙なく2～3 cmの青灰色火山灰を伴っている。軽石の他に安山岩質の岩片と黒曜石を少量含んでいる。MPは2.2～3.1 cmであり、軽石の有色鉱物は斜方輝石と単斜輝石であり、長柱状の斜方輝石を含むことが特徴である。

本層が、テフラ層全体が厚い波野村付近におけるどの軽石層に対比されるのかは明らかにできていない。さらに前述の野尻軽石 (NjP) との上下関係を直接確認できる露頭が発見できず、正確な層序関係は不明である。しかしながら、NjPがテフラ層全体が最も厚いカルデラ東区域においてAso-4の約2.5 m上位に存在するのに対して、本層はテフラ層がやや薄いカルデラ北東方でAso-4の約1～2 m上位の層準にあること (Fig. 2) から、現在のところNjPの方がAso-4に近い層準にあるものと考

えている。

3-3 山崎第10軽石～第6軽石 (YmP10-YmP6; 新称)

波野村山崎 (A9746地点) の地表下41.9～42.9 m付近およびA9903地点の50.6～51.5 m深付近 (両地点とも上位に不整合を挟む) には、火山灰土壌を挟んで、5層の降下軽石堆積物があり (Figs. 2, 4A)、下位より山崎第10軽石 (略称YmP10)～山崎第6軽石 (YmP6) と命名した。その中でも、浅黄色 (2.5Y7/3) の山崎第9軽石 (YmP9) と縞状軽石を含む山崎第8軽石 (YmP8) は層厚が大きく、明瞭である (Fig. 4A)。

3-4 山崎第5軽石～第1軽石 (YmP5-YmP1; 新称)

波野村山崎 (A9746およびA9903地点) では地表下40～50 m付近に、いくつかの軽石層を含み著しく成層した火山灰累層が存在する (Fig. 2)。この火山灰累層の全層厚はA9903地点で約8.8 m、A9746地点では約7.6 mであるが、多くの不整合面が挟まれるとともに、火山灰累層の最上位は侵食されており、堆積直後にはさらに厚かったと考えられる。この火山灰層は、カルデラ北東方においても確認することができ (地表下10～15 m付近、層厚1～2 m)、テフラの対比を行う上で、よい指標となっている。少なくとも10回以上のわずかな休止期は認められるが、全体としては比較的短時間に噴出したものと推定される。

この著しく成層した火山灰累層中には、概ね5つの層準に降下軽石が認められ、最下位付近に存在するのが山崎第5軽石 (略称YmP5) である。YmP5を含む火山灰累層の層厚は波野村山崎付近で2.3～2.5 mであり、下部1/3程度が主として軽石の挟在する火山灰層で、上部2/3程度が主としてスコリアを含む成層した火山灰累層からなる。火山灰累層最下部の黒褐色 (2.5Y3/1) 火山灰層 (層厚10～18 cm) の直上に、5つの軽石 (YmP5～YmP1) の中でも最も厚い軽石層が存在する。その軽石にはびい黄褐色 (10YR7/4) を呈し、層厚は13～44 cm (A9748地点で最大) で、中央付近に黒褐色火山灰層が挟在することがある。MPはどの地点も3.5 cm以上で、A9903地点では5.5 cmとなっていることから、分布主軸は東から東北東方向と推定される。軽石中の有色鉱物は斜方輝石と単斜輝石であるが、軽石層下部は黒曜石 (最大粒径0.5～2.2 cm) に富むことが特徴である。その軽石層から20～40 cm程度の成層した火山灰累層 (細砂～中砂) を挟んだ上位には軽石に富む黒褐色火山灰累層 (中砂～粗砂) があり、そのMPは0.7～2 cmである。この軽石混じり火山灰累層の上位からは、スコリアが卓越するようになる。

上位のYmP4～YmP1は、火山灰層中に挟在する軽石であり、それぞれ火山灰と成層している。このうち最上

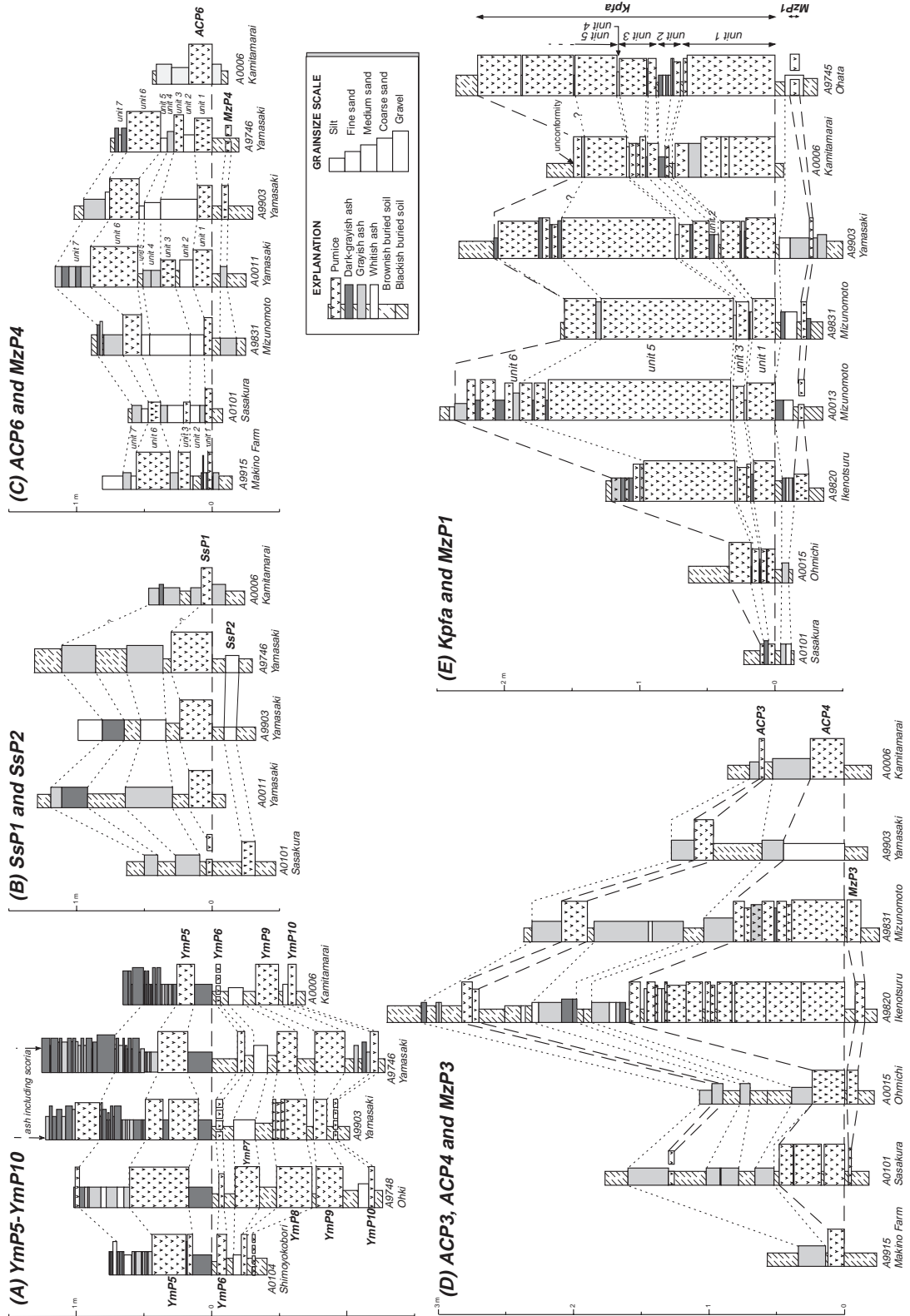
Table 2. Characteristics of pumice-fall deposits from Aso central cones during the past 90,000 years.

Pumice-fall deposit	Source for correlated lava	Age (ka)	Distribution (main axis)	Mafic mineral composition*	Bulk volume** (km ³)	VEI***	Characteristic features
Aso central cone pumice 1 (ACP1)	an area buried by Komezuka lava	4	E	opx, cpx, bi	unknown	<3	scattered in ash layer
Nakakubo pumice 1 (NbP1)	unknown	17	ENE-E	opx, cpx, ol	unknown	<3	scattered in ash layer
Nakakubo pumice 2 (NbP2)	unknown	18	ENE	opx, cpx	unknown	<3	scattered in soil layer
Hoteigaitani pumice (HP)	unknown	21-13	SE?	opx, cpx, ho	unknown	<3	contain banded pumice and scoria
Kusasenigahama pumice (Kpfa=ACP2)	Kusasenigahama	31	E and S	opx, cpx	2.39	5	6 fall units, one of the thickest pumice (key bed)
Mizunomoto pumice 1 (MzP1)	unknown	31	E-ESE	opx, cpx	unknown	3	include underlying grayish and blackish ash
Mizunomoto pumice 2 (MzP2)	unknown	36	unknown	opx, bi	unknown	<3	crystal rich
Aso central cone pumice 3 (ACP3)	Takanoobane	39	ENE	bi, opx, cpx	0.07	3	contain obsidian, banded pumice
Aso central cone pumice 4 (ACP4)	Tateno lava?	40	ENE	opx, cpx	0.43	4	several fall units, obsidian rich, include banded pumice
Mizunomoto pumice 3 (MzP3)	unknown	40	unknown	opx, cpx	unknown	3	contain banded pumice, obsidian
Aso central cone pumice 5 (ACP5)	unknown	45	NNE	opx, bi	0.15	4	contain biotite
Aso central cone pumice 6 (ACP6)	unknown	52	ENE	opx, cpx	0.11	4	7 fall units, poorly sorted
Mizunomoto pumice 4 (MzP4)	unknown	52	unknown	opx	unknown	<3	crystal poor
Ohmichi pumice 1 (OmP1)	unknown	55	unknown	opx, cpx	unknown	<3	scoria scattered, crystal poor
Sasakura pumice 1 (SpP1)	unknown	56	E	opx, cpx	0.07	3	obsidian rich
Sasakura pumice 2 (SpP2)	unknown	57	NE	ho, opx, cpx	0.07	3	hornblende rich
Yamasaki pumice 1 (YmP1)	unknown	61	unknown	opx, cpx	unknown	4	include overlying thick ash, magnetite poor, poorly vesiculated
Yamasaki pumice 2 (YmP2)	unknown	63	unknown	opx, cpx	unknown	<3	well stratified ash and pumice
Yamasaki pumice 3 (YmP3)	unknown	65	unknown	opx, cpx	unknown	<3	stratified ash and pumice
Yamasaki pumice 4 (YmP4)	unknown	67	E-ESE	cpx, opx	unknown	3	stratified ash and pumice
Yamasaki pumice 5 (YmP5)	unknown	68	ENE-E	opx, cpx	unknown	4	include underlying thick ash, stratified pumice and ash
Yamasaki pumice 6 (YmP6)	unknown	70-69	E	cpx, opx	unknown	3	contain banded pumice
Yamasaki pumice 7 (YmP7)	unknown	70-69	ENE-E	cpx, opx	unknown	3	include rounded fine vesicles
Yamasaki pumice 8 (YmP8)	unknown	70-69	ENE-E	opx, cpx	unknown	4	contain banded pumice, lithic rich, rounded vesicles
Yamasaki pumice 9 (YmP9)	unknown	70	ENE-E	opx, cpx	unknown	4	rounded vesicles
Yamasaki pumice 10 (YmP10)	unknown	70	E	opx	unknown	3	lithic rich
Yamasaki pumice 11 (YmP11)	unknown	71	unknown	opx, cpx	unknown	<3	crystal poor
Yamasaki pumice 12 (YmP12)	unknown	76	unknown	opx, cpx	unknown	3	stratified ash and pumice, abundant opx needles
Yamasaki pumice 13 (YmP13)	unknown	77	unknown	opx, cpx	unknown	3	lithic rich
Kamitamarai pumice 1 (KtP1)	unknown	78	unknown	opx, cpx	unknown	3	abundant opx needles
Kamitamarai pumice 2 (KtP2)	unknown	78	unknown	opx, cpx, bi	unknown	3	well vesiculated
Ogashiwa pumice (OgP)	unknown	80	NE?	opx	unknown	4	abundant opx needles
Matsuriba pumice 1 (MbP1)	unknown	85-80	unknown	opx, cpx, ho?	unknown	3	moderately weathered, crystal-poor
Matsuriba pumice 2 (MbP2)	unknown	85-80	unknown	cpx, opx	unknown	3	contain scoria
Matsuriba pumice 3 (MbP3)	unknown	85-80	unknown	opx, cpx	unknown	3	contain scoria
Nojiri pumice (NjP)	unknown	85	ESE-SE	opx, ho, opx, bi	unknown	4	divided by olive-brownish silty ash, contain hornblende

* mafic minerals: bi: biotite; cpx: clinopyroxene; ho: hornblende; ol: olivine; opx: orthopyroxene

** calculated by Fierstein and Nathenson's (1992) method

*** Volcanic Explosivity Index (Newhall and Self, 1982)



位に存在するのが山崎第1軽石(YmP1)で、淡黄色(2.5Y8/4)を呈している(Figs. 2, 3)。この厚い火山灰累層中では最下位のYmP5に次いで大規模なものであり、層厚は最も厚いA9903地点で22 cmで、MPは3.4 cmである。軽石層の下位と上位には厚い火山灰層を伴っている。軽石中の有色鉱物は斜方輝石と単斜輝石であるが、磁鉄鉱などの鉄鉱物は少ない。発泡は悪く、気泡の形もさまざまである。

3-5 笹倉第2軽石(SsP2)

笹倉第2軽石(略称SsP2)は、波野村笹倉(A0101地点)の地表下約21 mの露頭最下部付近(Fig. 2)で発見された浅黄橙色(10YR8/4)の軽石層である(宮縁・高田, 2002)。波野村山崎では、前述した火山灰累層上面から5 m上位付近の層準に存在している。軽石はやや風化しているが、A0101において層厚は10 cmで、MPは2.7 cmである。軽石中の有色鉱物は、角閃石を多量に含むことが特徴であり、他に斜方輝石と単斜輝石が認められる。この軽石層は、波野村笹倉においては純層をなしているが、南方の波野村山崎付近では軽石混じりのにぶい黄色(2.5Y6/4)火山灰層となること(Fig. 4B)から、分布主軸は阿蘇中央火口丘群から北東方向にあるものと考えられる。

3-6 笹倉第1軽石(SsP1)

笹倉第1軽石(略称SsP1)は、SsP2の上位10~20 cm付近に存在する降下軽石である(宮縁・高田, 2002)。本層が命名された波野村笹倉(A0101地点)では純層をなさない(MP: 1.6 cm)が、南方へ行くにしたがって、明瞭な軽石層となり、波野村山崎(A9746地点)では、層厚30 cmに達し(Fig. 4B)、MPは3.6 cmであることから、分布主軸は東方向であると推定される。軽石中の有色鉱物は、斜方輝石と単斜輝石であるが、本層はやや多量の黒曜石(最大粒径2 cm程度)を含むことが特徴である。上位には暗灰黄色(2.5Y4/2)を呈する2枚の降下火山灰層があり、本軽石層を対比する際の有用な手がかりとなっている。

3-7 九重火山飯田火砕流堆積物(Kj-Hnd)

飯田火砕流堆積物は、九重火山山麓に分布する角閃石デイサイト質の火砕流堆積物である(小野・他, 1977; 鎌田, 1997; 略称Kj-HndあるいはHnd)。本堆積物は阿蘇火山起源のテフラではないが、降下軽石の対比に重要なテフラである。

本層は波野村笹倉(A0101)より北方の地点においては、後述する阿蘇中央火口丘第6軽石の下位10~40 cm付近の火山灰層・火山灰土層中に角閃石デイサイトの岩片や軽石を含む淘汰の悪い火砕物として認められる(Fig. 2)。それらの岩片や軽石は飯田火砕流堆積物に含

まれるものに酷似しており、高田(1989)が示した飯田火砕流堆積物の層準とも一致している。これらのことから、このデイサイト質岩片・軽石を含む堆積物は飯田火砕流堆積物の末端相と考えられる。今回、この火砕物が認められた地点は、いずれも飯田火砕流堆積物の主要な分布域(小野・渡辺, 1985)よりも南~南西に位置するが、わずか4.5 km以内にあり、火砕流の辺縁部やそれに伴う火砕サージが到達したものと考えられる。

3-8 阿蘇中央火口丘第6軽石(ACP6)

阿蘇中央火口丘第6軽石(高田, 1989; 略称ACP6)は、カルデラ北東方では地表下8~11 m付近の火山灰土層中に挟在する降下軽石である(Fig. 2)。Aso-4以降のテフラ累層全体の厚さが増す波野村水ノ元付近(A9831地点)では地表下約35.5 mに認められる。

ACP6は、複数のフォールユニットからなり、全体的には淘汰の悪い軽石および火山灰層からなることが特徴である。地点ごとにフォールユニット数は異なるが、大きく7つのフォールユニットに区分される(Fig. 4C)。最下位のユニット1は、比較的淘汰の良い、にぶい黄橙色(10YR7/4)降下軽石層である。波野村山崎(A0011, A9903, A9746地点)付近で最も厚く、層厚は11~14 cmでMPは1.9~2.4 cmである。ユニット2~5は黄褐色(2.5Y5/4)~にぶい黄色(2.5Y6/4)を呈して、非常に淘汰の悪い細砂~シルト質の火山灰層である。全体的に軽石混じりであるが、ユニット3は淡黄色(2.5Y8/4)軽石のほぼ純層をなしている(MP1.8~2.6 cm)。ユニット6は比較的淘汰の良い淡黄色(2.5Y8/4)の降下軽石層であり、灰色味を帯びた軽石や縞状軽石が含まれる。層厚はA0011地点で32 cmと最大で、MPは3.7~4.3 cmであり、ACP6中で最も規模の大きいフォールユニットである。また、このユニットは角張った黒曜石や岩片を含むことが特徴で、その最大粒径は2.7 cm(波野村笹倉A0101地点)である。最上位のユニット7は成層した砂質火山灰層であり、軽石が混在している。

ACP6の全層厚は、ユニット1やユニット6の層厚と調和して波野村山崎付近で最大となっており、分布主軸は阿蘇中央火口丘群から東北東方向にある(Fig. 5A)。なお、層厚分布から求めた見かけ体積は0.11 km³となる(Table 2)。

軽石中の有色鉱物は、斜方輝石、単斜輝石である。高田(1989)は、ACP6が角閃石を含む軽石であるとしたが、カルデラ北東方のACP6について再検討を行った結果、斜方輝石と単斜輝石を含むものの角閃石は認められないことが判明している(宮縁・高田, 2002)。

ACP6をもたらし噴火の推移をまとめると、以下のようになる。軽石を噴出するプリニー式噴火によって開

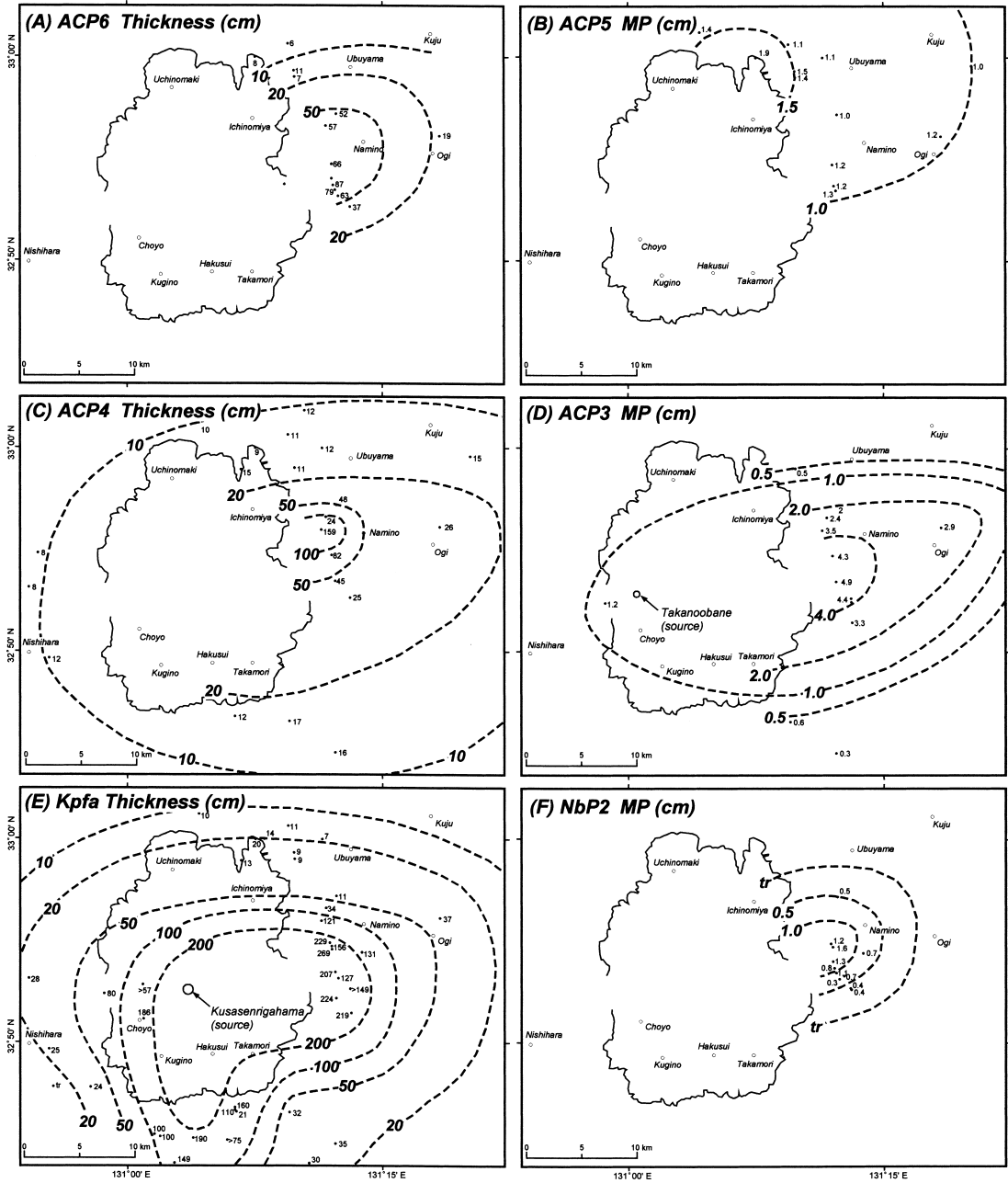


Fig. 5. Distribution of thickness and maximum pumice size for six pumice-fall deposits from Aso central cones. (A), (C), (E): Isopach maps. (B), (D), (F): Maximum size isopleth maps using the average long-axis diameter of the three largest pumice at each locality.

始し(ユニット1), つぎに降下軽石を伴いながら淘汰の悪いデイサイト~流紋岩質火山灰を噴出する噴火に推移する(ユニット2~5)が, このフェーズにおいては軽石の噴出量に変化があり, ユニット3では軽石を多く噴出していた. 続いて, 最大規模のプリニー式噴火を起こし

(ユニット6), その後は成層した火山灰層を堆積させる噴火へと変化した. このように ACP6 は非常に複雑な噴火による産物と考えられる. なお, ACP6 はほとんど時間間隙をおかずして, 厚い降下スコリア堆積物(波野村山崎付近で全層厚6 m程度)に覆われる(Figs. 2, 3).

オリーブ褐色 (2.5Y4/4) 火山灰土層 (層厚 6~10 cm) を挟んだ ACP6 の下位には浅黄色 (2.5Y7/4) の水ノ元第 4 軽石 (略称 MzP4) が存在する。

3-9 阿蘇中央火口丘第 5 軽石 (ACP5)

阿蘇中央火口丘第 5 軽石 (略称 ACP5) は、黒雲母斑晶に特徴づけられる降下軽石である (高田, 1989)。本層は、ACP6 から多数の降下スコリアを挟んだ上位 1~5 m 付近に存在している (Fig. 2)。この軽石が純層をなす地点は確認されていないが、カルデラ北東方では火山灰土が混在するものの、かなり明瞭な軽石層となっている。一の宮町手野 (A9806 地点) では層厚 16 cm 程度と最大であり、南方へ行くにしたがって層厚は薄くなる。カルデラ東方の波野村付近では火山灰土層中に軽石が散在する産状を示す。MP の分布も層厚分布と調和的で、一の宮町手野で最大値 1.9 cm であることから、本層の分布主軸は阿蘇中央火口丘群から北北東方向にあることがわかる (Fig. 5B)。ACP5 の見かけ体積は 0.15 km³ 程度と考えられる。

軽石が散在する層準の直下~下位 50 cm 付近には、やや固結した暗灰黄色 (2.5Y4/2) の火山灰層 (層厚 25~160 cm 程度) があり (Figs. 2, 3)、ACP5 を対比する際の手がかりとなっている (宮縁・高田, 2002)。

3-10 阿蘇中央火口丘第 4 軽石 (ACP4)

阿蘇中央火口丘第 4 軽石 (高田, 1989; 略称 ACP4) は、後述する草千里ヶ浜軽石とともに阿蘇カルデラ周辺域において最も良い指標となるテフラの一つである。

この軽石層は多数のフォールユニットで構成され、詳細なユニット対比はできていないが、多くの地点では黄褐色 (10YR5/6) 粘土層によって 3~4 のユニットに区分される (Fig. 4D)。その粘土層の存在は、噴火中にわずかな時間間隙があった可能性を示唆している。最下位のフォールユニットは最も厚く、黒曜石に富むことが特徴である。また最下位から中部にかけてのユニットは縞状軽石が多く混在している。さらに最上位のユニットには発泡の悪い軽石も含まれる。

軽石は全体的に淡黄色 (2.5Y8/4)~黄色 (2.5Y8/6) を呈し、有色鉱物としては斜方輝石と単斜輝石が認められる。

ACP4 全体の層厚は、波野村池ノ鶴 (A9820 地点) で最大 159 cm であり、東方では大分県荻町新藤 (A0212 地点) においても 26 cm の層厚を有している (Fig. 5C)。分布主軸は東北東方向にあるが、カルデラ西方においても本層を確認することができる。この ACP4 の見かけ体積は、0.43 km³ 程度である (Table 2)。

また、この軽石層は埋没土壌層を挟まずに黄褐色 (2.5Y5/3) の火山灰層に覆われることが、各露頭に共通した

特徴である。

黄褐色の (10YR5/6) 粘土質火山灰土層 (層厚 2~8 cm) を挟んだ ACP4 の下位には、縞状軽石と黒曜石を含む水ノ元第 3 軽石 (略称 MzP3) が存在する。

3-11 阿蘇中央火口丘第 3 軽石 (ACP3)

高田 (1989) は、阿蘇中央火口丘第 3 軽石 (略称 ACP3) が火山灰層を挟んだ ACP4 の上位に存在する軽石であり、黒雲母斑晶を含むことが特徴であると報告している。今回詳細な調査を行った結果、ACP4 との間には複数の黄褐色 (2.5Y5/3) 火山灰層および火山灰土層が存在することが明らかとなった (Fig. 4D) が、いずれにせよ ACP4 との組み合わせが本層確認の手がかりとなっている。

本層が純層をなすのは、波野村池ノ鶴 (A9820 地点) から水ノ元 (A9831 地点) にかけての地域であり、層厚は 13~19 cm 程度である。それ以外の地点では軽石が火山灰層中に散在する産状を示す。カルデラ北東方でわずかに認められるのみであるが、東方の荻町新藤 (A0212 地点) においては MP が 2.9 cm と大きい。一方、カルデラ西縁の長陽村立野 (A0001 地点) においてもその存在が確認できる (MP 1.2 cm)。これらのことから、ACP3 は東北東方向に軸をもつ、細長い分布を示すことがわかる (Fig. 5D)。なお、層厚分布から ACP3 の見かけ体積は 0.07 km³ 程度と考えられる。

軽石層中には黒曜石や縞状軽石を含み、上部にはやや発泡の悪い軽石も混じっている。また、ほとんど時間間隙をおかずに層厚 30 cm 程度の火山灰層に覆われることが特徴である。

3-12 草千里ヶ浜軽石 (Kpfa) (阿蘇中央火口丘第 2 軽石)

草千里ヶ浜降下軽石 (渡辺・他, 1982; 略称 Kpfa) は、阿蘇カルデラ周辺域における鍵層となっているテフラである。カルデラ北東方においては地表下 5~7 m、東方においては地表下 15~19 m 付近に存在し、上位約 0.5~1 m には広域テフラである始良 Tn 火山灰 (略称 AT) が認められ (Fig. 2)、この両層の存在はカルデラ周辺域におけるテフラ対比のよい手がかりとなっている。高田 (1989) は、本軽石を阿蘇中央火口丘第 2 軽石 (略称 ACP2) と命名しているが、噴出源が唯一断定されていることなどから、草千里ヶ浜軽石と呼ばれることが多い。

Kpfa も ACP6 や ACP4 と同様に、多数のフォールユニットで構成されている。波野村笹倉 (A0101 地点) より以北では風化が激しく層厚も薄くなるために、フォールユニットの識別が困難であるが、それより南の地点では明瞭な 6 つのフォールユニットに区分できる (Fig. 4E)。

本層はカルデラの全周囲で確認できるテフラであり、

全フォールユニットをあわせた層厚は、東方と南方に軸をもつ特異な分布をしている (Fig. 5E)。これは、後述するようにフォールユニット毎に異なった分布を示すためである。

最下位のユニット1は層厚10~80 cmで、平均粒径0.5~2 cm程度 (MP2.8~3.4 cm) の浅黄色 (5Y7/3) 軽石からなる。ユニットの中央付近には黒色火山灰が2層確認できることがあり、上部と下部に分けられる。下部はやや淘汰が悪く、逆級化構造が認められる。上部は下位に比べて細粒で淘汰がよい。全体的に岩片量は少ないが、下部にはわずかな岩片と黒曜石が含まれるとともに、縞状軽石が存在する。また最上位には灰色の火山灰層がみられる。このユニットは、南に行くほど層厚が大きくなる (Fig. 4E) ため、分布主軸は東南~南方向にあるものと考えられる。

ユニット2は、細砂~中砂粗砂の火山灰互層からなる。色調は下部が灰色から黄白色、上部が黒色を呈する。このユニットも南方ほど層厚が大きくなり (Fig. 4E)、堆積構造も複雑で下部は細粒な軽石の互層となる。ユニット1との間にはにぶい黄褐色 (10YR5/4) 粘土層 (層厚約2 cm) が認められることもあり、噴火中にわずかな時間間隙の存在も示唆される。

ユニット3は、極粗砂~1 cm程度の淘汰の良い軽石からなっている。中央付近には黄白色や黒色の火山灰層が挟まることがある。南に行くにしたがって層厚、粒径ともに大きくなる (Fig. 4E)。また高森町大畑 (A9745 地点) においてのみ、ユニット2との間にオリーブ褐色 (2.5Y4/3) 粘土層が認められる。

ユニット4は、浅黄色 (2.5Y7/3) を呈する細砂~中砂質の火山灰層である。どの地点においても、層厚は概ね2~3 cm程度で、明瞭に認められる。炭化物を含むことがあるが、下位および上位のユニットとの間にはほとんど時間間隙は存在しないものと考えられる。

ユニット5は、最も厚くて粗粒で、Kpfaの主体をなすフォールユニットである。最下位10 cm程度は細粒で淘汰がよく、上部ほど粗粒で淘汰も悪くなる。また最上部20 cm程度はやや細粒で黒色火山灰を挟むことがある。MPは下部が1.2~2 cm、中部が2.9~5 cm、上部が2.2~2.7 cmである。下部ほど黒色岩片や黒曜石が多く含まれる。このユニットの層厚は、波野村水ノ元 (A0013 地点) において最も大きく (135 cm)、そこから北方および南方に向かって小さくなる (Fig. 4E)。したがって、分布主軸は東北東方向にあるものと考えられる。

最上位のユニット6は、黒色火山灰 (中砂質) を含む部分が互層するユニットであり、全体的に灰色~黒色を呈している。下位のユニットに比べて淘汰が悪く、黒色

および縞状軽石がやや多量に含まれる。さらに岩片や黒曜石も多く認められる。このユニットもA0013地点において層厚が52 cmと最大で、ユニット5と同様の分布を示すものと考えられる。ユニット3~6までの間には時間間隙を示すような堆積物は認められない。

全ユニットの層厚分布 (Fig. 5E) から求めた見かけ体積は2.39 km³で、VEIは5となり (Table 2)、KpfaはAso-4以降、最大級の噴火による産物であることがわかる。

Kpfa直下の90~150 cm程度は黒色味の強い (暗オリーブ褐色: 2.5Y3/3) 埋没土壌層となっており (Figs. 2, 3)、これは阿蘇カルデラ周辺域に特徴的なものとなっている (渡辺・高田, 1990; 山田・久保寺, 1996)。この土壌層中には、層厚4~14 cmの水ノ元第1軽石 (略称 MzP1) やスコリア、複数の火山灰層が挟在している。直下の埋没黒ボク土層の存在もKpfaを認定する上のよい手がかりとなっている。

3-13 中久保第2軽石 (NbP2; 新称)

本層は、カルデラ東方域において地表とKpfaとの間のほぼ中央付近 (地表下5.5~12 m) の褐色火山灰土中に散在する軽石として認められる (Fig. 2)。その層準から当初、阿蘇中央火口丘群南側斜面において中岳古期山体溶岩流 (小野・渡辺, 1985) の上位に認められる保手が谷軽石 (略称 HP; 馬場・他, 1999) に対比されると考えられた (宮縁・高田, 2002)。しかし、HPが斑晶鉱物として角閃石を含む (馬場・他, 1999) のに対し、本層の軽石中には有色鉱物として斜方・単斜輝石しか認められなかった。また本層のMP分布は、馬場・他 (1999) が示した分布とは異なり、主軸は東北東方向にある (Fig. 5F)。したがって、本層はHPとは別の軽石である可能性が高いため、中久保第2軽石 (略称 NbP2) と新称を与えた。HPに関しては、本層と近い層準に存在するものと考えられるが、具体的な層準を特定するには至らなかった。本層が純層として観察される地点は存在しないが、80~120 cm上位の中久保第1軽石 (略称 NbP1) とともにAT以降のスコリア層を対比する際の有用な鍵層となっている。

3-14 阿蘇中央火口丘第1軽石 (ACP1)

阿蘇中央火口丘第1軽石 (高田, 1989; 略称 ACP1) は、K-Ahの上位に存在し、完新世では唯一の降下軽石である (Figs. 2, 3)。この軽石が純層をなすのは中央火口丘群北西部の蛇ノ尾付近 (A9458 地点) のみで、それ以外の地点では中岳N7期 (3,780~3,650 yrs BP) 火山灰層中に散在する (渡辺, 1992; 宮縁・渡辺, 1997)。このような産状はカルデラ東方域まで追跡することが可能で (小野・他, 1995)、完新世におけるよい鍵層となっている。軽石中の有色鉱物としては黒雲母を含むことが特徴であ

る (高田, 1989).

4. 降下軽石の噴出年代

阿蘇カルデラとその周辺地域においては、広域テフラ以外にいくつかのテフラと埋没土層の¹⁴C年代値がこれまで報告されている。

宮縁・渡辺 (1997) はテフラ間に挟在する埋没黒ボク土層の¹⁴C年代から完新世主要テフラの噴出年代を推定し、ACP1 は約 3,700 yrs BP であると述べている。また、地表から連続する黒ボク土層最下部の年代については北東外輪山付近で約 11,000 yrs BP という¹⁴C年代が得られている (山田・他, 1997)。さらに、カルデラ周辺で鍵層となっている草千里ヶ浜軽石 (Kpfa) の噴出年代は約 26,600 yrs BP と報告されている (山田・他, 1997)。Aso-4 火砕流堆積物に関しては、89±7 ka という K-Ar 年代が得られている (松本・他, 1991)。しかしながら、Kpfa より下位の降下テフラの放射年代については、これまで全く報告例がない。

そこで、本研究では阿蘇カルデラおよびその周辺域において、テフラ直下の埋没土層を多数採取し、加速器質量分析 (AMS) 法による¹⁴C年代測定を実施した (Table 3)。分析は 10 点の試料に関しては米国 Beta Analytic 社に依頼したが、それ以外の 14 試料については、筆者の一人である徐が核燃料サイクル開発機構東濃地科学センターのタンデム型加速器質量分析計 (NEC 社製 15SDH-

2 型) を使用して行った。なお、どちらの分析も¹⁴C年代の算出には、Libby の半減期 5,568 年を使用し、 $\delta^{13}\text{C}$ (¹³C/¹²C 比) によって同位体分別効果を補正し、さらに暦年較正を行った (Table 3)。¹⁴C年代の暦年較正は 20,000 yrs BP までの年代については Stuiver *et al.* (1998) を、20,000 yrs BP より古い年代は Kitagawa and van der Plicht (1998) のデータセットを用いている。以下の議論では、¹⁴C年代でなく暦年較正年代 (cal yrs BP) を用い、それらの年代については他の方法で得られた年代と同様に ka の単位で示す。また、風乾した土壌試料は粉碎した後、九州沖縄農業研究センター所有の Elementar 社製全自動元素分析装置 vario EL を用いて、炭素・窒素含有量を定量した。

地表から Aso-4 までが観察された産山村牧野牧場 (A 9915 地点) におけるテフラなどの層位と年代を Fig. 6 に示した。その地点では全ての降下軽石を観察できるわけではないが、存在しない軽石については層序関係の対比によって推定されるおおよその層準を表示している。

まず前章で述べた阿蘇カルデラ周辺域において普遍的に存在する草千里ヶ浜軽石 (Kpfa) 直下の埋没黒ボク土層 (渡辺・高田, 1990; 山田・久保寺, 1996) 最上部の較正年代は約 31 ka であり、山田・他 (1997) の年代を暦年較正した結果ともほぼ一致しており、Kpfa の噴出年代として妥当であることが確認された。また、この埋没黒ボク土層基底部の較正年代は約 32 ka で、上下の層位間

Table 3. Results of AMS ¹⁴C dating for buried soils around Aso caldera.

Stratigraphic position	Sampling site	Depth (m)	C (%)	N (%)	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ (¹³ C/ ¹² C ratio)	Conventional ¹⁴ C age* (yrs BP)	Lab code	Calibrated age** (cal yrs BP)
soil below YmS4	A9746	5.7	0.50	0.08	6.27	-22.8	14,680 ± 80	Beta- 116207	17,570
soil below YmS15 ash	A9746	9.8	0.25	0.02	11.64	-22.1	18,120 ± 100	Beta- 116206	21,530
soil below Nakadake ash	A0101	8.2	-	-	-	-22.5	17,840 ± 90	Beta- 164163	21,210
soil above AT ash	A0101	8.6	-	-	-	-22.6	20,830 ± 100	Beta- 164164	24,000
soil below Kpfa	A9745	20.5	0.70	0.06	10.97	-18.5	26,730 ± 260	Beta- 115302	31,000
bottom of blakish soil	A0101	11.3	1.49	0.09	16.21	-20.7	27,700 ± 200	JNC- 3933	32,000
soil above ACP3	A9745	25.7	0.13	0.03	4.47	-17.7	24,380 ± 460	Beta- 115303	28,000
soil above ACP3	A9831	24.9	0.28	0.02	15.29	-24.0	25,200 ± 200	JNC- 3942	30,000
soil below ACP3	A9831	25.4	0.21	0.01	16.59	-22.5	20,500 ± 150	JNC- 3937	24,000
soil below ACP4	A0101	15.0	0.23	0.02	11.31	-21.9	16,150 ± 90	JNC- 3934	19,260
soil below ACP4	A9745	28.0	0.23	0.06	3.81	-22.4	26,550 ± 250	Beta- 115301	31,000
soil below MzP3	A9831	27.4	0.28	0.02	14.10	-22.8	30,000 ± 250	JNC- 3938	33,000
soil below MzP3	A0101	15.0	0.34	0.03	11.24	-22.5	30,900 ± 250	JNC- 3935	34,000
soil above ACP5	A9831	28.5	0.21	0.01	19.56	-22.8	23,600 ± 170	JNC- 3941	26,000
soil below ACP5	A9915	9.2	0.99	0.06	15.68	-22.8	32,600 ± 300	JNC- 3947	36,000
soil below ACP5	A9831	31.7	0.36	0.02	19.54	-22.1	26,300 ± 200	JNC- 3940	31,000
soil below ACP6	A0101	18.8	0.30	0.02	13.02	-20.7	23,800 ± 160	JNC- 3936	26,000
soil below MzP4	A9831	36.5	0.35	0.02	18.88	-22.5	27,900 ± 200	JNC- 3939	32,000
soil below Handa pfl	A9915	11.6	0.91	0.07	13.30	-22.9	24,050 ± 160	JNC- 3948	28,000
soil below SsP1	A9903	36.3	0.27	0.01	30.43	-22.2	31,400 ± 250	JNC- 3944	35,000
soil below SsP1	A9746	29.2	-	-	-	-20.6	34,590 ± 470	Beta- 115304	37,000
soil below SsP2	A9903	36.5	0.29	0.02	17.04	-22.8	29,800 ± 250	JNC- 3945	33,000
soil below YmP1	A9746	36.7	0.11	0.02	4.35	-23.2	22,860 ± 310	Beta- 115305	25,000
soil below YmP9	A9746	42.7	0.19	0.03	5.64	-21.7	20,350 ± 150	Beta- 117639	24,000

* ¹⁴C ages in the table were analyzed based on the Libby's ¹⁴C half life of 5568 years, and calculated using $\delta^{13}\text{C}$ values.

** calibrated for <20,000 yrs BP by data sets (Stuiver *et al.*, 1998) and for >20,000 yrs BP by data sets (Kitagawa and van der Plicht, 1998)

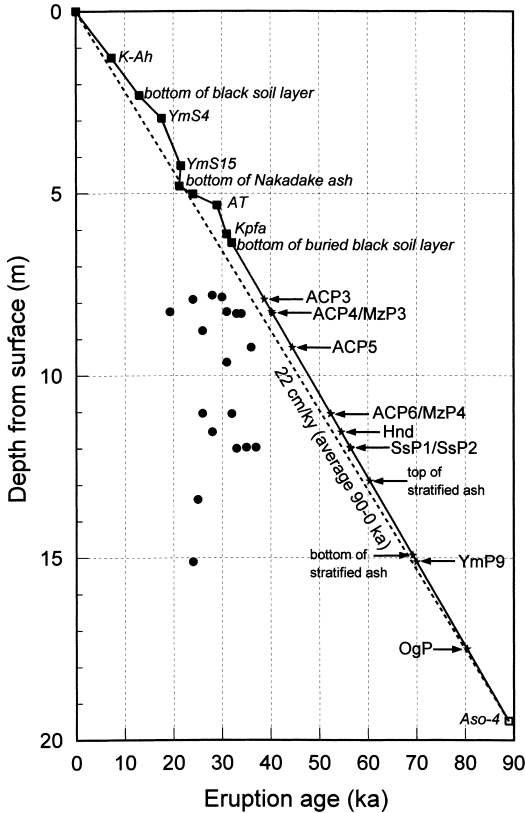


Fig. 6. Relation between stratigraphic positions of major tephra layers and their eruption ages at site A9915. Solid squares show ^{14}C ages reconciled with stratigraphic positions of each tephra. Ages of K-Ah and AT are given in Machida and Arai (1978; 1992) and Ikeda *et al.* (1995), respectively. Open square marks K-Ar age of Aso-4 pyroclastic flow deposit (Matsumoto *et al.*, 1991). Solid circles denote ^{14}C ages of tephra below Kusasenrigahama pumice-fall deposit (Kpfa); they are incongruous with stratigraphic relations. Eruption ages of tephra layers below Kpfa were assumed by average accumulation rate between Kpfa (31 ka) and Aso-4 pyroclastic flow deposit (89 ka). Broken line denotes average accumulation rate of tephra for about 90,000 years.

係や山田・他(1997)が報告した28,100 yrs BP(約32 ka)という年代とも調和している。

さらに下位に存在する埋没土壌層の較正年代はFig. 6に黒丸で示したが、それらの多くは上位のKpfaよりも若い年代が得られ、層位関係と矛盾している。MzP3直下の土壌から得られた約33 kaと約34 kaという2つの較正年代は層位関係と矛盾したものではない。しかし、ACP4直下の土壌の較正年代は約19 kaと約31 kaであ

り、ACP4とMzP3はほぼ同じ層位にあるにもかかわらず、それらの年代値は11,000年以上の範囲にばらついている。さらにACP5についても、約36~26 kaと年代値は1万年の幅をもっている。

このように、Kpfa直下の埋没黒ボク土層より下位の層準から得られた較正年代値の大部分は、層位関係と矛盾するものであり、また矛盾していなくても同じ層位で大きくばらついている。これは、土層生成後に地下水などの影響で汚染されるなどして、実際よりも若い年代になった結果と推定される。これらの土壌試料に関しては、今後再測定や年代値のスケールオーバーの有無などの検討が必要であると考え、現時点においては採用しないことにした。

そこで、本論ではKpfa直下埋没黒ボク土層基底部(地表下6.36 m; 約32 ka)とAso-4(地表下19.48 m; 89 ka)の層位と年代を用いて(直線による比例配分)、Kpfaより下位に存在する主要な降下軽石の噴出年代を推定した(Fig. 6)。この2点間を結んだ直線は過去約9万年間の平均堆積速度(Fig. 6の破線)にほぼ近いことがわかる。

今回用いた方法によって、主要な降下軽石の噴出年代は、OgPが約80 ka、YmP9が約70 ka、YmP5が約69 ka、SsP2が約57 ka、SsP1が約56 ka、ACP6が約52 ka、ACP5が約45 ka、ACP4が約40 ka、ACP3が約39 kaとなり、またAT~K-Ah間に存在するNp2の年代は約18 kaと推定された。さらに、Aso-4とOgP間に存在するNjPの年代は85 ka前後と考えられた。

同様の方法によると、ACP6下位に挟在する九重火山起源の飯田火砕流堆積物の噴出年代は約54 kaとなる。飯田火砕流の年代については、これまで多くの報告がある。町田(1980)は、飯田火砕流ステージの噴出物である九重第1軽石の噴出年代をATやAso-4火砕流の年代と層位関係から35~30 kaと推定した。最近では、川辺・他(1996)が飯田火砕流堆積物を覆う別の火砕流堆積物の ^{14}C 年代として45,590±990 yrs BPを報告しており、奥野・他(1998)も飯田火砕流堆積物下部に含まれる炭化木片と火砕流直下の土壌の加速器 ^{14}C 年代として>40,000 yrs BPを得ている。また鎌田・他(1998)は、飯田火砕流堆積物中のジルコンのフィッシュン・トラック年代として、80~70 kaを報告している。今回得られた飯田火砕流の推定噴出年代は、川辺・他(1996)や奥野・他(1998)の結果とは調和しているが、鎌田・他(1998)の年代値とはややかけ離れた結果となっている。飯田火砕流堆積物とAso-4との間には膨大な量の降下テフラが存在することがわかっている(Fig. 3)。Aso-4のK-Ar年代は89 kaであり(松本・他, 1991)、飯田火砕流の年代として80~70 kaを採用したとすると、Aso-4噴火後1~

2万年間に相当高い噴出率を仮定しなければならない。このことは、阿蘇カルデラ形成直後から2万年以内に多量の火山岩（中央火口丘群西部のボーリングコアで厚さ約800 m）が噴出されたとする宇都・他（1994）の考えとも調和するものであるが、カルデラ東方域のテフラ層序からは飯田火砕流の上位と下位で、それほど大きな噴出率の変化があったとは見えない。以上のことから、飯田火砕流の噴出年代としては50 ka前後が適当ではないかと考えている。

噴出量はさまざまであるが、小規模な降下軽石堆積物も考慮すると、阿蘇中央火口丘群はAso-4以降、2,500年に1回程度の頻度で軽石を噴出する噴火を繰り返していることが明らかとなった。

5. 噴出源の推定と阿蘇中央火口丘群山体との対比

これまで阿蘇中央火口丘群起源の降下軽石の特徴とそれらの主要なものの推定噴出年代について述べた。降下軽石の大部分はカルデラ内で観察できないために、等層厚線や分布軸から噴出中心を求める方法は適用できない。本章では、軽石の斑晶鉱物や年代により、噴出源である中央火口丘群山体との対比を試みる。

まず完新世の降下軽石であるACP1の給源は、その分布から米塚溶岩に覆われる地域とされている（小野・他、1995）が、対応する山体が地表に存在しておらず、具体的な火口位置が特定されていない。

Kpfaは、その名称からわかるように噴出源が唯一明らかになっている降下軽石である。その分布が示すだけでなく、給源である草千里ヶ浜火口に隣接する斜面では、軽石の厚い溶結部が存在している（渡辺・他、1982）。

黒雲母斑晶を含むACP3（39 ka）とACP5（45 ka）の給源としては、阿蘇中央火口丘群で唯一の黒雲母流紋岩である高野尾羽根火山（渡辺、2001）が当初考えられた（高田、1989）。高野尾羽根溶岩（火山研究所溶岩；小野・渡辺、1985）の上位には、厚いテフラを挟まずにKpfaが堆積していることから判断すると、高野尾羽根火山がACP3の給源火山である可能性が高い。高野尾羽根溶岩ではすでに 51 ± 5 kaというK-Ar年代が得られており（松本・他、1991）、その年代と今回得られたACP3の噴出年代（39 ka）にはやや差があるが、大きな矛盾はないであろう。

角閃石を含むSsP2（57 ka）は、輝石角閃石デイサイトの本塚火山（小野・渡辺、1985）が噴出源である可能性が推定された。本塚火山のK-Ar年代は 46 ± 9 kaであり（松本・他、1991）、SsP2の推定噴出年代はK-Ar年代の誤差範囲に近い値である。しかし、本塚火山の溶岩には

ほんのわずかの角閃石しか含まれない（Watanabe and Katsui, 1976）のに対し、SsP2には多量の角閃石が認められる。両者の間には角閃石含有量に非常に大きな差があることから、SsP2の給源は本塚火山ではなく、現在の中央火口丘群の地下に存在する山体であると推定される。

他の軽石については、特徴的な斑晶鉱物組合せが認められないために、噴出源の推定は難しいが、中央火口丘群溶岩の層序関係（小野・渡辺、1985；渡辺、2001）から考慮すると、ACP4（40 ka）は輝石デイサイトの立野溶岩に対比される可能性がある。しかしながら、他にも輝石安山岩～輝石デイサイトの白水火山（ 30 ± 6 ka；松本・他、1991）やデイサイト～安山岩の御籠門山火山などの火山があり、対比には問題を残している。ACP5より下位の降下軽石については、現在地表には見えていない中央火口丘群初期の岩体（宇都・他、1994；渡辺、2001）に対比されると考えられる。

このように、本研究によって発見された36層に及ぶ降下軽石堆積物の噴出源は、阿蘇火山において現在地表に現れている山体だけでは説明することができず、中央火口丘群の地下にはデイサイト～流紋岩質の山体が多く存在していることを示唆している。

6. テフラ層序からみた阿蘇中央火口丘群における過去約9万年間の噴火史の概要

Aso-4火砕流以降に堆積したテフラの大部分は、岩相が酷似した降下スコリアおよび火山灰からなり（Fig. 3）、それらの対比にはまだまだ多くの問題が存在している。しかし、本論で述べた30層以上の降下軽石堆積物の発見は、膨大なテフラ累層を対比する際の大きな手がかりとなっている。そこで本章では、鍵層となる降下軽石層をもとに過去約9万年間における阿蘇火山の噴火史、軽石をもたらした噴火の規模や頻度、さらに噴火史全体の中での軽石噴火の意味について考察する（Fig. 7）。

Aso-4以降、70 ka頃までの約2万年間は、降下軽石・スコリアを噴出する噴火を間欠的に繰り返したが、約85 kaにVEI 4～5程度の野尻軽石（NjP）と約80 kaにVEI 4程度の小柏軽石（OgP）を噴出した。給源は現在、地下に埋もれる中央火口丘群初期の山体（宇都・他、1994；渡辺、2001）であると考えられる。

70～60 kaには軽石の噴出（山崎第5軽石：YmP5）に始まる多量の火山灰を放出する噴火が継続し、周辺地域に著しく成層した火山灰層を堆積させた（Fig. 2）。その噴火中には間欠的に軽石（山崎第4～第1軽石：YmP4～YmP1）も放出している。

60 ka以降はスコリア噴火を間欠的に繰り返し、発泡の悪いスコリアや岩片をカルデラ東方域に堆積させた

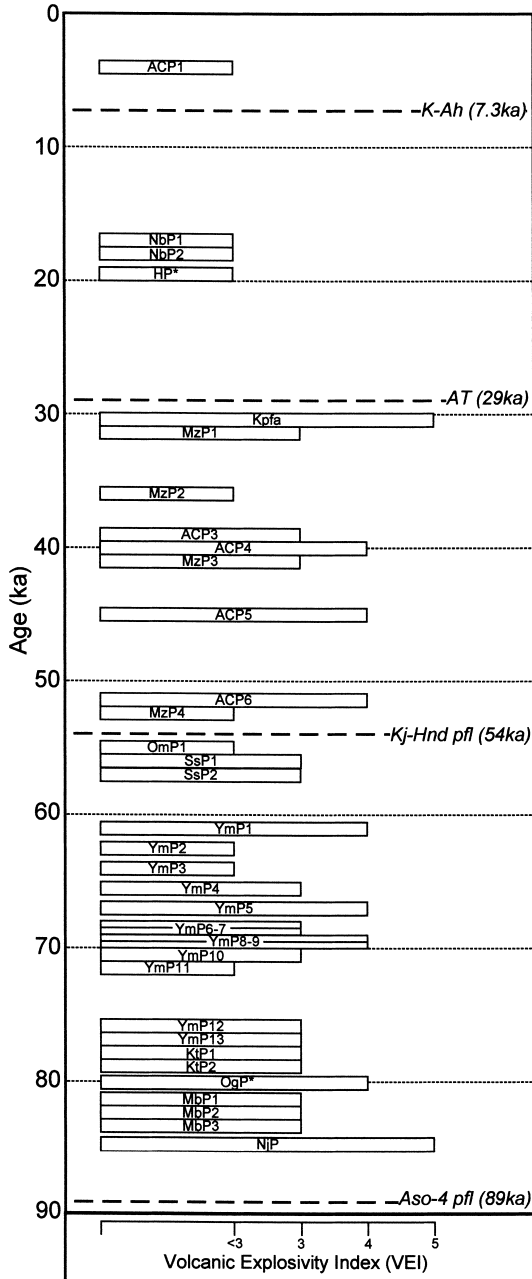


Fig. 7. Stratigraphy and explosive magnitude of pumice-fall deposits from Aso central cones during the past 90,000 years. Detail names of pumice-fall deposits are shown in Tables 1 and 2. *Accurate stratigraphic positions cannot be determined.

が、約 57 ka には角閃石を多量に含む笹倉第 2 軽石 (SsP2) を、さらに 56 ka には笹倉第 1 軽石 (SsP1) を噴出している。52 ka 頃までは、火山灰とスコリアを交互に噴出

する噴火が繰り返され、約 54 ka には九重火山から飯田火砕流の噴出があった (Fig. 3)。

その直後 (52 ka) に複雑なフォールユニットをもつ阿蘇中央火口丘第 6 軽石 (ACP6) が降下堆積する。ACP6 噴出後はほとんど時間間隙をおかずして、厚い降下スコリア (波野村山崎付近で全層厚 6 m 程度) を堆積させる噴火へと移行した (Fig. 3)。

そのスコリア噴火の後には、火山灰を放出する噴火などが間欠的に起こっているが、45 ka 頃には黒雲母斑晶を含む阿蘇中央火口丘第 5 軽石 (ACP5) をもたらす噴火が発生した。それからスコリアや火山灰を噴出した後、40 ka に Aso-4 以降最大級の噴火の一つ (VEI 4) が発生して阿蘇中央火口丘第 4 軽石 (ACP4) を降下堆積させた。火山灰噴出が継続した後、39 ka に高野尾羽根火山の位置で阿蘇中央火口丘第 3 軽石 (ACP3) の噴出と黒雲母流紋岩ドームを形成する噴火 (小野・渡辺, 1985) が起こった。

39~32 ka にはスコリアを放出する噴火が間欠的に起こるが、32~31 ka は比較的静穏な時期に入ると、阿蘇火山周辺では黒ボク土層が生成し (渡辺・高田, 1990; 山田・久保寺, 1996)、旧石器時代の遺跡も残された (小畑・他, 2001)。

約 31 ka には Aso-4 以降最大級の噴火 (VEI 5) が草千里ヶ浜で発生し、草千里ヶ浜軽石 (Kpfa) がカルデラ周辺の広範囲に堆積した。その後は AT (29 ka; 奥野, 2002) の堆積があるが、その頃再び比較的静穏な時期となり、旧石器人の活動が認められる (小畑・他, 2001; 宮縁・高田, 2002)。

21 ka には中岳火山の活動が開始し、最初は火山灰とスコリアの噴出が続き (宮縁・高田, 2002)、中岳古期山体溶岩 (小野・渡辺, 1985) の流出があった (馬場, 1999)。その後も中岳はスコリアを間欠的に放出する (宮縁・他, 2002) が、13 ka を境に活動はそれまでの時期と比較してかなり穏やかとなり、灰噴火を主体とする噴火スタイル (小野・他, 1995; Ono *et al.*, 1995) へと推移した。

K-Ah (7.3 ka) 以降も間欠的に灰噴火を継続するが、4 ka (宮縁・渡辺, 1997) には現在米塚溶岩に覆われる地域で阿蘇中央火口丘第 1 軽石 (ACP1) を放出する噴火が起こった (小野・他, 1995)。3.7~3 ka には杵島岳・往生岳で降下スコリアを噴出する準プリニー式噴火が発生した (中村・渡辺, 1995; 宮縁・渡辺, 1997)。その後も中岳は休止期や静穏期を挟みながら、灰噴火を主体とした活動を現在まで継続している。

過去約 9 万年間に軽石を放出した噴火をみると、最も大規模な VEI 5 のプリニー式噴火が 2 回 (NjP と Kpfa 噴出)、VEI 4 の噴火が 8 回発生しており、VEI 4 以上の

噴火は1万年間に1回程度起こっていることがわかる。また、それよりも規模の小さいVEI 3の噴火が16回、VEIが3より小さいと推定される噴火は10回とさらに高い頻度で発生していることが明らかとなった(Fig. 7)。

最後に、噴出物量の時間的変化をみるために、阿蘇火山における最近9万年間の降下テフラ噴出物量階段図を作成した(Fig. 8)。主要な軽石に関しては体積を計算できた(Table 2)が、鍵層間のテフラについては、降下スコリア・火山灰・小規模な軽石・火山灰土層を含めた全層厚分布図を作成して、主要な軽石と同様の方法によって見かけ体積を算出し、斜線(鍵層間の線分)として表現している。火山灰土層中には、大陸起源の風成塵や他火山から飛来したテフラが混入していることは否定しないが、それらの堆積速度は活火山が近隣に存在しない地域で20~40 mm/ky程度と報告されており(鈴木, 1995)、阿蘇火山の噴出物量に比べると無視し得るものと考えられる。また、テフラの密度は阿蘇中岳の降下火山灰で得られた値1.2 g/cm³(渡辺, 1991)を採用し、溶岩換算量(DRE; 2.5 g/cm³)として表している。なお、Fig. 8に示したのは、Aso-4以降の降下テフラの噴出物量のみであり、中央火口丘群山体の溶岩や火砕岩の体積は含まれていないこと、さらに草千里ヶ浜軽石(Kpfa)より下位のテフラに関しては正確な噴出年代が得られていないので、階段図として示すには若干の問題がある。

阿蘇火山における最近約9万年間の降下テフラ全噴出量(DRE)は18.1 km³と見積もられ、平均すると約0.2 km³/kyとなる。この値は、最近2.5万年間の霧島火山の平均テフラ噴出量0.09 km³/ky(井村, 1994)の2倍程度で、また10~3万年前の始良カルデラ火山のテフラ噴出量0.36 km³/ky(長岡・他, 2001)と同じオーダーである。

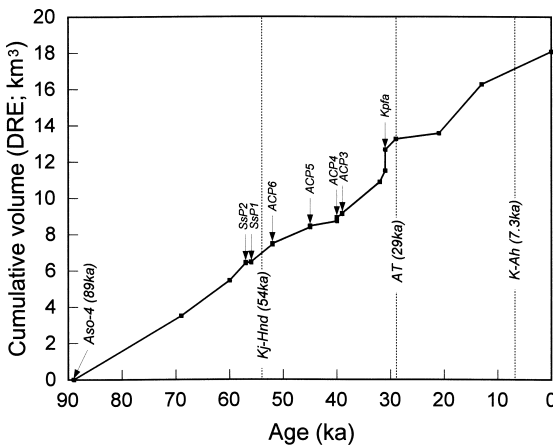


Fig. 8. Cumulative erupted volume versus time for air-fall tephra layers after the Aso-4 eruption (89 ka).

2,500年間に1回程度噴出している降下軽石についてみると、Kpfaのみ約1.1 km³(DRE)であるが、他の軽石は全て0.1 km³以下のオーダーであり、約9万年間全体の中で考えると、全噴出量に対する降下軽石の寄与は大きくない。降下軽石をもたらず噴火は相対的に規模が大きいものと考えられるが、阿蘇中央火口丘群全体の噴火史の中ではむしろ、発生頻度の高い降下スコリアや火山灰を放出する噴火が累積噴出量の増加に寄与しているようである。

阿蘇中央火口丘群山体の体積は37 km³と報告されている(第四紀火山カタログ委員会, 1999)が、この値は現在のカルデラ底(標高約500 m)より上部に存在する火山体の体積と考えられる。近年のボーリング調査によると、Aso-4直後の約2万年間にカルデラを埋積する多量の火山岩類の存在が報告されている(宇都・他, 1994; 星住・他, 1997)。また、阿蘇カルデラで得られた重力データ(小野・他, 1993)によると、カルデラ底の下位には直径12 km、高さ800 mの円柱に近似できる山体の存在が推定される。これらのことから、中央火口丘群山体の全体積は127 km³程度と見積もることができ、さらに山体の密度を2.2 g/cm³と仮定する(小野・他, 1993)と、DRE換算で約112 km³となる。これは、降下テフラ全噴出量の約6倍の値である。阿蘇中央火口丘群山体と降下テフラを合わせた約9万年間の全噴出量は約130 km³となり、平均マグマ噴出率は約1.5 km³/kyと算出され、日本の第四紀火山の平均値0.1~1 km³/ky(小野, 1990)と同等あるいは、1オーダー大きな値である。

7. まとめ

阿蘇カルデラ形成以後の阿蘇中央火口丘群降下テフラは、カルデラ東方域において厚さが100 mに達する累層となっている。その累層は降下スコリアと火山灰を主体としていて岩相変化に乏しいが、それらに挟在する降下軽石堆積物は対比を行う上で有用な鍵層である。本論では、比較的対比が容易である主要な降下軽石堆積物の層序や岩相、噴出年代について明らかにした。

主要な軽石層とそれらの年代は、下位より野尻軽石(NjP; 85 ka)、小柏軽石(OgP; 80 ka)、山崎第5軽石(YmP5; 69 ka)、笹倉第2軽石(SsP2; 57 ka)、笹倉第1軽石(SsP1; 56 ka)、阿蘇中央火口丘第6軽石(ACP6; 52 ka)、同第5軽石(ACP5; 45 ka)、同第4軽石(ACP4; 40 ka)、同第3軽石(ACP3; 39 ka)、草千里ヶ浜軽石(Kpfa; 31 ka)、中久保第2軽石(NbP2; 18 ka)、阿蘇中央火口丘第1軽石(ACP1; 4 ka)である。大部分の軽石に含まれる有色鉱物は斜方輝石と単斜輝石であるが、NjP、ACP5、ACP3とACP1には黒雲母斑晶が含まれ、NjPとSsP2

には角閃石斑晶が認められ、こうした特徴はテフラの対比に有用であった。

阿蘇火山における最近約9万年間の降下テフラ全噴出量(DRE)は18.1 km³と見積もられ、平均すると約0.2 km³/kyである。この中で1回の噴火における軽石の噴出物量は0.03~1.1 km³と規模の違いはあるが、阿蘇中央火口丘群はAso-4以降、2,500年に1回程度の頻度で軽石を噴出する噴火を繰り返しており、規模の大きなVEIが4以上の噴火は1万年に1回程度発生していることが明らかとなった。また、36層に及び降下軽石層の存在は、阿蘇火山において現在地表に現れている山体以外に、デイサイト~流紋岩質の山体が中央火口丘群の地下に多く存在していることを示唆している。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、熊本県阿蘇地域振興局林務課には工事情報の提供を受けるとともに、現地調査の許可をいただいた。林道工事担当者には調査の便宜をはかっていただいた。熊本県文化課の馬場正弘氏には阿蘇火山のテフラについて貴重なご意見をいただいた。炭素・窒素含有量の測定では、農業技術研究機構九州沖縄農業研究センターの荒川祐介氏にお世話になった。U. S. Geological SurveyのCynthia A. Gardner氏には英文を校閲していただいた。また、2名の匿名査読者と編集担当である東宮昭彦氏のコメントは本論を改稿する上でたいへん有益であった。以上の方々から感謝いたします。

引用文献

馬場正弘(1999)阿蘇南郷谷に伏在する溶岩流. 熊本地学会誌, **120**, 2-8.
 馬場正弘・渡辺一徳・宮縁育夫(1999)阿蘇中央火口丘南部における中岳の噴出物の層序. 熊本大学教育学部紀要(自然科学), **48**, 133-146.
 第四紀火山カタログ委員会(編)(1999)日本の第四紀火山カタログ. 日本火山学会, CD-ROM.
 Fierstein, J. and Nathenson, M. (1992) Another look at the calculation of fallout tephra volumes. *Bull. Volcanol.*, **54**, 156-167.
 早川由紀夫・井村隆介(1991)阿蘇火山の過去8万年間の噴火史と1989年噴火. 火山, **36**, 25-35.
 星住英夫・渡辺一徳・阪口圭一・宇都浩三・小野晃司・中村 武(1997)阿蘇カルデラ内の深部ボーリングコアで確認された阿蘇4火砕流堆積物. 日本火山学会1997年秋季大会講演予稿集, **5**.
 池田晃子・奥野 充・中村俊夫・筒井正明・小林哲夫(1995)南九州, 始良カルデラ起源の大隅降下軽石と入戸火砕流中の炭化樹木の加速器質量分析法による¹⁴C年代. 第四紀研究, **34**, 377-379.
 井村隆介(1994)霧島火山の地質. 地震研究所彙報, **69**,

189-209.
 鎌田浩毅(1997)宮原地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 127 p.
 鎌田浩毅・檀原 徹・伊藤順一・星住英夫・川辺禎久(1998)九重火山起源の宮城・下坂田・飯田火砕流堆積物のジルコンのフィッシュ・トラック年代. 火山, **43**, 69-73.
 川辺禎久・星住英夫・伊藤順一・鎌田浩毅(1996)九重火山南麓に分布する小規模火砕流堆積物とその¹⁴C年代. 火山噴火予知連絡会会報, **66**, 100-101.
 Kitagawa, H. and van der Plicht, J. (1998) A 40,000-year varve chronology from lake Suigetsu, Japan: Extension of the ¹⁴C calibration curve. *Radiocarbon*, **40**, 505-515.
 町田 洋(1980)岩戸遺跡のテフラ(火山灰). 「大分県岩戸遺跡」—大分県清川村岩戸における後期旧石器文化の研究, 広雅堂書店, 443-453.
 町田 洋・新井房夫(1976)広域に分布する火山灰—始良Tn火山灰の発見とその意義. 科学, **46**, 339-347.
 町田 洋・新井房夫(1978)南九州鬼界カルデラから噴出した広域テフラ—アカホヤ火山灰. 第四紀研究, **17**, 143-163.
 町田 洋・新井房夫(1992)火山灰アトラス—日本列島とその周辺. 東京大学出版会, 276 p.
 松本哲一・宇都浩三・小野晃司・渡辺一徳(1991)阿蘇火山岩類のK-Ar年代測定—火山層序との整合性と火砕流試料への適応—. 日本火山学会1991年度秋季大会講演予稿集, **73**.
 宮縁育夫・渡辺一徳(1997)埋没黒ボク土層の¹⁴C年代からみた完新世阿蘇火山テフラの噴出年代. 火山, **42**, 403-408.
 宮縁育夫・高田英樹(2002)波野村筥倉永迫遺跡のテフラ層序. 熊本地学会誌, **129**, 2-12.
 宮縁育夫・星住英夫・渡辺一徳(2002)阿蘇火山における約2万~1万年前の降下スコリア堆積物. 日本第四紀学会講演要旨集, **32**, 34-35.
 長岡信治・奥野 充・新井房夫(2001)10万~3万年前の始良カルデラ火山のテフラ層序と噴火史. 地質雑, **107**, 432-450.
 長友由隆・庄子貞雄(1977)アカホヤ, イモゴ, オンジの対比ならびに噴出源について—アカホヤの土壌肥科学的研究(第2報). 日本土壌肥科学雑誌, **48**, 1-7.
 中村 武・渡辺一徳(1995)阿蘇火山杵島岳・往生岳の噴出物と黒ボク土に関する知見について. 熊本地学会誌, **110**, 2-5.
 Newhall, C. G. and Self, S. (1982) The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. Geophys. Res. (Oceans & Atmospheres)*, **87**, 1231-1238.
 小畑弘己・岡本真也・古森政次・渡辺一徳・田口清行(2001)いわゆる「阿蘇産黒曜石」の産地発見とその意義—阿蘇象ヶ鼻産ガラス質溶結凝灰岩露頭の発見—. 旧石器考古学, **62**, 63-76.
 奥野 充(2002)南九州に分布する最近約3万年間のテフラの年代学的研究. 第四紀研究, **41**, 225-236.
 奥野 充・中村俊夫・鎌田浩毅・小野晃司・星住英夫(1998)九重火山, 飯田火砕流堆積物の加速器¹⁴C年代. 火山, **43**, 75-79.

- 小野晃司 (1989) 阿蘇火山の岩石. 日本火山学会 1989 年度秋季大会火山学セミナー「阿蘇火山」, 8-14.
- 小野晃司 (1990) 火山噴火の長期的予測. 火山, 34, 特別号, S201-S214.
- 小野晃司・渡辺一徳 (1983) 阿蘇カルデラ. 月刊地球, 5, 73-82.
- 小野晃司・渡辺一徳 (1985) 阿蘇火山地質図 (5 万分の 1). 火山地質図 4, 地質調査所.
- 小野晃司・松本徭夫・宮久三千年・寺岡易司・神戸信和 (1977) 竹田地域の地質. 地域地質研究報告, 5 万分の 1 図幅, 地質調査所, 145 p.
- 小野晃司・渡辺一徳・駒澤正夫 (1993) 重力データからみた阿蘇カルデラの構造. 月刊地球, 15, 686-690.
- 小野晃司・渡辺一徳・星住英夫・高田英樹・池辺伸一郎 (1995) 阿蘇火山中岳の灰噴火とその噴出物. 火山, 40, 133-151.
- Ono, K., Watanabe, K., Hoshizumi, H. and Ikebe, S. (1995) Ash eruption of the Naka-dake crater, Aso volcano, southwestern Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 66, 137-148.
- 小山正忠・竹原秀雄 (1967) 新版標準土色帖. 農林水産省農林水産技術会議事務局・財団法人日本色彩研究所.
- Stuiver, M., Reimer, P. J., Bard, E., Beck, J. W., Burr, G. S., Hughen, K. A., Kromer, B., McCormac, G., van der Plicht, J. and Spurk, M. (1998) INTCAL 98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon*, 40, 1041-1083.
- 鈴木毅彦 (1995) いわゆる火山灰土 (ローム) の成因に関する一考察—中部から関東に分布する火山灰土の層厚分布—. 火山, 40, 167-176.
- 高田英樹 (1989) 阿蘇中央火口丘群のテフラ概報. 熊本地学会誌, 90, 8-11.
- 宇都浩三・阪口圭一・渋谷明貴・吉岡 恒 (1994) 阿蘇カルデラ内の深部ボーリングコアの K-Ar 年代測定: カルデラ形成直後の火山活動史の解明. 日本火山学会 1994 年度秋季大会講演予稿集, 211.
- 渡辺一徳 (1991) 阿蘇火山中岳の火山活動. 熊本地学会誌, 98, 2-13.
- 渡辺一徳 (1992) 阿蘇火山. 日本地質学会第 99 年学術大会見学旅行案内書, 13-32.
- 渡辺一徳 (2001) 阿蘇火山の生い立ち—地質が語る大地の鼓動—. 一の宮町史 自然と文化阿蘇選書 7, 一の宮町, 241 p.
- Watanabe, K. and Katsui, Y. (1976) Pseudo-pillow lavas in the Aso caldera, Kyushu, Japan. *J. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, 71, 44-49.
- 渡辺一徳・高田英樹 (1990) 阿蘇カルデラ周辺域における火山灰層と黒ボク土の斜交. 熊本大学教育学部紀要 (自然科学), 39, 21-27.
- 渡辺一徳・藤本雅太郎 (1992) 表層地質図「阿蘇山・竹田」および説明書, 土地分類基本調査 (5 万分の 1), 熊本県, 15-28.
- 渡辺一徳・小野晃司・平塚勝一 (1982) 草千里ヶ浜火山の軽石噴火について. 火山, 27, 337-338.
- 渡辺一徳・河野年美・田上貴史・平江美香・高田恵美 (1991) 阿蘇火山中岳の最近 1.5 万年の活動史. 地球惑星科学関連学会合同大会日本火山学会固有セッション講演予稿集, 39.
- 山田一郎・久保寺秀夫 (1996) 阿蘇外輪山およびその周辺地域における阿蘇 4 以降のテフラ層序と土壌層序. 九州農業試験場研究資料, 83, 1-35.
- 山田一郎・佐瀬 隆・久保寺秀夫 (1997) 阿蘇外輪山及びその周辺の黒ボク土の生成年代と古植生. 日本第四紀学会講演要旨集, 27, 154-155.

(編集担当 東宮昭彦)